Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 305-316

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۳۱۶-۳۰۵

مقاله علمی-پژوهشی

پتانسیل‌سنجی و مدل‌سازی تولید بیوگاز از تفاله‌های آب‌میوه‌گیری سیب

مسلم سامی[۱]، اسداله اکرم[۲]*، محمد شریفی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

چکیده

این مطالعه به‌منظور بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از تفاله‌های آب‌میوه‌گیری سیب و مدل‌سازی فرآیند تولید صورت پذیرفته است. بدین منظور تولید بیوگاز از تفاله‌های سیب تحت شرایط مختلف دمایی شامل سایکروفیلیک، مزوفیلیک و ترموفیلیک بررسی گردید. نتایج مطالعه حاکی از پتانسیل تئوری بالای تولید متان بیوشیمیایی تفاله‌های سیب می‌باشد ($۴۷۳/۷ ml g-VS^{-1}$) که تحت شرایط آزمایشگاهی این مطالعه تا ۶۳/۹ درصد این پتانسیل (برابر میزان $۳۰۲/۷۰ ml g-VS^{-1}$) استحصال گردید. نتایج نشان داد که هر سه مدل سینتیک گومپرتز، لجستیک و ریچاردز به‌خوبی قادر هستند روند تولید متان تجمعی از تفاله‌های سیب را مدل‌سازی کنند هرچند که نتایج مدل لجستیک بهتر و قابل قبول‌تر می‌باشد. همچنین این مدل‌ها تحت دمای مزوفیلیک و ترموفیلیک تطابق بیشتری با روند تولید داشتند. نتایج بررسی تاثیرات دما بر روی تولید بیوگاز نشان داد که با افزایش دما میزان تولید افزایش و زمان ماند و زمان پیک تولید کاهش یافت اما میزان تولید تیمارهای ۳۷ و ۴۷ درجه از نظر آماری معنی دار نبوده است.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، پتانسیل‌سنجی، مدل‌سازی، متان

مقدمه

هضم بی‌هوازی، فرآیند تجزیه مواد ارگانیک در غیاب اکسیژن می‌باشد که باعث تولید متان، دی‌اکسیدکربن، آمونیاک و مقداری از گازهای دیگر همچنین اسیدهای آلی سبک می‌گردد (Lopes *et al.*, 2004). امروزه فرآیند هضم بی‌هوازی نه‌تنها با هدف کنترل آلودگی محصولاتی همچون فاضلاب (Chen *et al.*, 2009) زباله‌های صنعتی (Ağdağ and Sponza, 2007) و زباله‌های شهری (Alzate-Gaviria *et al.*, 2007) به‌کار می‌رود بلکه به یکی از فرآیندهای اصلی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر همچون بیوگاز و هیدروژن تبدیل گردیده‌است (DingWang, 2008). مطالعات مختلفی جهت بررسی پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات کشاورزی صورت پذیرفته‌است (Lianhua *et al.*, 2010). پتانسیل‌سنجی قابلیت تولید بیومتان روشی نسبتاً آسان و قابل اعتماد برای به‌دست آوردن میزان مواد ارگانیک قابل تبدیل به متان می‌باشد (Symons and Buswell, 1933). این مطالعات جهت طراحی و راه‌اندازی هاضم‌های غیرهوازی ارزشمند می‌باشند (Raposo *et al.*, 2011). آزمایشات هضم گسسته کوتاه مدت (یک الی دو ماهه) همچون مطالعات پتانسیل‌سنجی بیومتان[۴] (BMP) با هدف اولیه اندازه‌گیری متان و قابلیت تجزیه‌پذیری مواد ارگانیک اجرا می‌گردند (Raposo *et al.*, 2011). روش‌های زیادی نیز با رویکردهای تئوری جهت تخمین فرآیند هضم مواد ارگانیک ارائه گردیده‌اند. آزمایش‌ها بر پایه روش‌های استوکیومتری که محصول نهایی فرآیند هضم را تخمین می‌زنند از جمله اولین روش‌های ارائه شده می‌باشند (Symons and Buswell, 1933). آزمایش‌های جدید بر پایه روش‌های پیچیده‌تری بنا نهاده شده‌اند که واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی شیمیایی هضم بی‌هوازی را جهت تخمین محصول نهایی فرآیند هضم شبیه‌سازی می‌کنند (Labatut *et al.*, 2011).

با توجه به اهمیت فاکتورهای زمان و فرآیند هضم و همچنین پتانسیل تولید متان جهت طراحی هاضم‌های صنعتی و تحلیل فرآیند هضم ضایعات کشاورزی، پتانسیل‌سنجی و مدل‌سازی فرآیند هضم محصولات مختلف توسط محققین مختلفی صورت پذیرفته است. این مطالعات نتایج متفاوتی را از میزان پتانسیل تولید بیوگاز محصولات مختلف ارائه داده‌اند. به‌عنوان مثال: میزان پتانسیل تولید $ml g-VS^{-1}$ ۲۵۱ برای تولید متان از ضایعات کاهو (Hoseinzadeh, 2013)، $ml g-VS^{-1}$ ۵۴۳ برای تولید متان از ضایعات پرتقال (Shariatifar, 2014)، ۱۴۲، ۲۶۰ و ۱۷۰ میلی‌لیتر بر گرم وزن ماده جامد فرار به‌ترتیب برای تولید متان از پسماندهای موز، کلزا و نیشکر (Sahito *et al.*, 2013) $۳۱۶ ml g-VS^{-1}$ برای تولید بیوگاز از ترکیب خاک اره و ساقه کلزا (Laurinovica *et al.*, 2013) و $۱۵۴ ml g-VS^{-1}$

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: aakram@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.80322

4- Bio Methane Potential Evaluation

برای تولید متان از علوفه سیلویی (Xie *et al.*, 2011) گزارش گردیده است.

سیب یکی از محبوب‌ترین میوه‌ها در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد (*Malus Domestica Borken*) که به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از مناطق معتدل جهان کشت می‌گردد (Agrahari and Khurdiya, 2003). میزان تولید جهانی سیب در دنیا در سال ۲۰۱۷ برابر میزان ۸۳/۸ میلیون تن بوده است که از این میزان ایران با تولید ۲/۱ میلیون تن در رده هفتم تولید قرار گرفته است (FAOSTAT, 2019). با توجه به حجم صادرات و سرانه مصرف پایین سیب در ایران می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حجم زیادی از این محصول در ایران به‌صورت ضایعات دورریز می‌گردد یا به‌مصارف خوراک دام می‌رسد. با توجه به‌حجم زیاد ضایعات سیب در ایران این مطالعه بر پایه پتانسیل‌سنجی و مدل‌سازی تولید بیوگاز تفاله‌های آب‌میوه‌گیری سیب طراحی گردید است.

مواد و روش‌ها

جهت پتانسیل‌سنجی تولید بیوگاز از تفاله‌های سیب اقدام به ساخت تعدادی هاضم با ظرفیت 1000 میلی‌لیتر و ظرفیت کاری ۴۰۰ الی ۵۰۰ میلی‌لیتر گردید. یک پروانه کوچک چرخشی که از یک جعبه‌دنده و موتور DC نیرو می‌گیرد وظیفه هم‌زنی هاضم به میزان ۲۴ بار در شبانه‌روز هر بار به‌مدت ۱۵ دقیقه را بر عهده دارد (شکل ۱). جهت کنترل دمای هاضم‌ها، از روش غوطه‌ورسازی هاضم‌ها در حمام آب گرم استفاده گردید و دمای آب اطراف هاضم‌ها توسط یک المنت و یک مدار فرمان کنترل گردید. سه دمای مختلف کاری سایکروفیلیک[1] (دمای محیط) مزوفلیک[2] (۳۷ درجه) و ترموفیلیک[3] (۴۷ درجه) (سه تیمار) تحت ۳ تکرار (تعداد ۹ هاضم) در قالب طرح کاملاً تصادفی بر روی هاضم‌ها اعمال گردید (Safley Jr and Westerman, 1992). جهت کنترل دمای تیمار سایکروفیلیک، هاضم‌ها عایق گردیدند تا تغییرات دمای محیط تاثیرات کمتری بر روی تغییرات دمایی هاضم‌ها داشته باشد و همچنین بر اثر فعالیت باکتری‌ها دمای هاضم‌ها نسبت به محیط مقداری افزایش یابد. در شرایط سایکروفیلیک دمای هاضم‌ها بین ۲۱ تا ۲۵ درجه سیلیسیوس متغیر بود. در شرایط تیماری مزوفیلیک شرایط دمایی تحت دمای ۰/۷±۳۷ درجه و در شرایط ترموفیلیک تحت دمای ۰/۹±۴۷ در طی آزمایش کنترل گردید. جهت آغاز فرآیند، تفاله‌های سیب با راه‌انداز (مایه تلقیح)[4] تهیه شده از کود گاوی به نسبت ۵۰ درصد وزنی TS مخلوط گردید. به‌منظور آزمایش‌های پتانسیل‌سنجی و یا تحلیل تولید بیوگاز نسبت راه‌انداز به سوبستراهای متفاوتی گزارش گردیده است. نسبت‌های کوچک کل مواد جامد فرار ($^{-1}$g-VS l ۲/۱) (El-Mashad and Zhang, 2010) تا نسبت‌های زیاد ($^{-1}$g-VS l ۳۷/۲) (Rincón *et al*., 2010) در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. استاندارد VDB 4630 استفاده از یک رنج بین ۱۵ الی ۲۰ گرم ماده جامد فرار بر لیتر راه‌انداز را جهت آزمایش‌های پتانسیل‌سنجی توصیه کرده است. مطالعات عنوان می‌دارند که هرچه نسبت مایه تلقیح به‌سوبسترا بیشتر باشد فرآیند هضم سریع‌تر صورت می‌پذیرد، که بعضی منابع حداقل نسبت دو برابر وزن جرمی ماده جامد فرار مایه تلقیح به‌سوبسترا را به‌عنوان میزان مناسب عنوان نموده‌اند (Raposo *et al*., 2011). جهت تهیه راه‌انداز مقداری کود گاوی تحت شرایط هضم قرار گرفت و توسط تفاله‌های سیب به‌مرور زمان و به‌مقدار کم تغذیه گردیدند تا باکتری‌های متان‌زا نسبت به تغذیه با تفاله‌های سیب تطبیق یابند. پس از آن‌که ظرفیت تولید متان کود گاوی پایان یافت و تولید بیوگاز آن ناچیز گردید از محلول باقی‌مانده به‌صورت مخلوط به‌عنوان راه‌انداز استفاده گردید. یک تیمار راه‌انداز به‌عنوان کنترل منفی[5] مورد هضم قرار گرفته و میزان بیوگاز تولیدی آن از بیوگاز تیمارهای دمایی کسر گردید. با توجه به اسیدی بودن تفاله سیب و با توجه به‌این‌که فرآیند متان‌زایی شامل فرآیندهای اسیدزایی می‌گردد که خود باعث کاهش pH محلول و اختلال در روند تولید بیوگاز می‌گردد جهت افزایش ظرفیت تامپونی[6] سوبسترا از محلول هیدروکسیدسدیم جهت افزایش pH آغازین تا میزان ۸/۰ استفاده گردید (Fang *et al*., 2014). آزمایش تحت تیمار کل مواد جامد ۷٪ صورت پذیرفت که با اضافه‌کردن آب مقطر کل مواد جامد به‌میزان مطلوب کاهش داده شد.

نمونه تفاله‌های مورد استفاده ازخروجی یک کارخانه آب‌میوه‌گیری سیب در جنوب استان اصفهان جمع‌آوری گردید. مشخصات تفاله‌های مورد استفاده به شرح جدول ۱ با توجه به نتایج آزمایشگاه تجزیه مواد نمونه‌های جمع‌آوری شده مطابق استاندارد (AOAC, 1990) آورده شده است. جهت اندازه‌گیری گاز تولیدی از روش جایگزینی با آب (شکل ۲) استفاده گردید و میزان گاز خروجی به‌صورت روزانه اندازه‌گیری و ثبت گردید.

از آن‌جایی که گاز CO_2 موجود در بیوگاز قابلیت حلالیت بالایی در آب دارد، حل شدن CO_2 در آب هنگام اندازه‌گیری می‌تواند در دقت اندازه‌گیری اختلال ایجاد کند. لذا بر پایه مطالعات گذشته از مخلوط آب نمک به‌عنوان سیال جهت اندازه‌گیری حجم بیوگاز استفاده گردید. به‌طور متداول محلول آب اسید رقیق و آب نمک یا

1- Psychrophilic
2- Mesophilic
3- Thermophilic
4- Inoculum

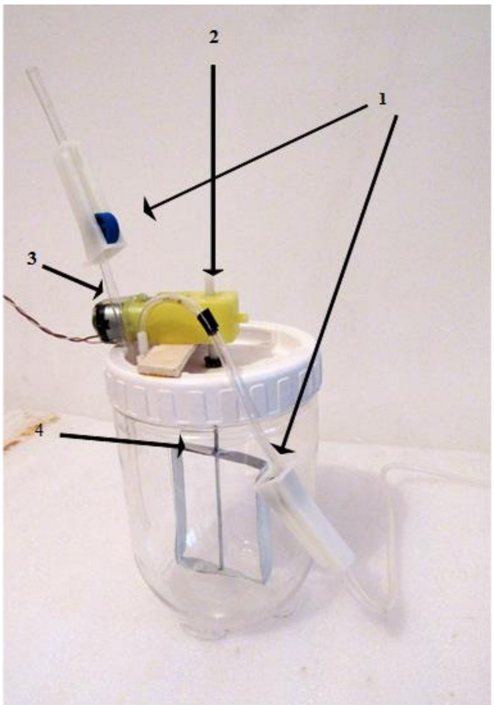
5- Negative control
۶- ظرفیت تامپونی به‌صورت توانایی محلول برای مقاومت در برابر تغییرات pH تعریف می‌گردد.

ترکیب این دو به‌عنوان سیال اندازه‌گیری حجم در مطالعات مختلف پیشنهاد شده است که در این مطالعه با توجه به‌نتایج مطالعات (Walker *et al.*, 2009) مبنی بر مزیت استفاده از آب نمک از این محلول استفاده گردید.

با توجه به‌تأثیر دما و فشار محیط بر روی اندازه‌گیری حجم، از رابطه (۱) جهت تصحیح حجم گاز استفاده گردید.

$$V_{STP} ، \frac{P_{gas}}{P_{STP}} \times \frac{T_{STP}}{T_{gas}} \times V_{gas} \quad (۱)$$

که در این رابطه: V_{gas}حجم گاز اندازه‌گیری شده، V_{STP}حجم گاز تصحیح شده، P_{STP} فشار استاندارد، P_{gas} فشار گاز اندازه‌گیری شده، T_{gas} دمای گاز اندازه‌گیری شده (بر حسب کلوین) و T_{STP} دمای استاندارد می‌باشد (Strömberg *et al.*, 2014).

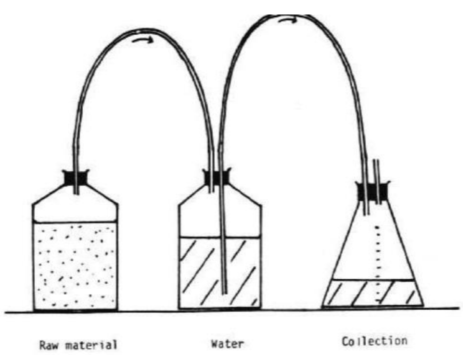


شکل ۱- نمونه هاضم مورد استفاده

۱. لوله‌های خروج گاز، ۲. مجموعه چرخ‌دنده کاهنده سرعت، ۳. موتور DC، ۴. پروانه چرخشی

Fig.1. A type of used digester

1. Gas output and sampling pipes, 2. Speed reducing gearbox, 3. DC motor, 4. Impeller



شکل ۲- روش‌های متداول اندازه‌گیری گاز خروجی از هاضم آزمایشگاهی (Raposo *et al.*, 2008)

Fig.2. Common methods for laboratory biogas measuring

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی تفاله‌های سیب مورد استفاده

Table 1- Chemical composition of used apple pomace

پارامتر **Parameter**	میزان اندازه‌گیری شده **Quantity**
pH	3.8-4.3
کل مواد جامد Total solids (٪)	29.0-32.0
کل مواد جامد فرار Volatile solids (٪)	27.2-34.7
خاکستر کل Ash (g kg-dry mater^{-1})	23.8-26.7
چربی کل Fat (g kg-dry mater^{-1})	64.2-68.5
پروتئین کل Protein (g kg-dry mater^{-1})	57.2-59.9
کربوهیدرات غیر فیبری (g kg-dry mater^{-1}) Non fiber carbohydrates	259.1-299.8
چگالی حجمی (g l^{-1}) Density	901.0-942.5
نسبت کربن به ازت C/N ratio	18.1-19.3

در این مطالعه از روش عبور سیال از محلول بی‌کربنات‌سدیم جهت اندازه‌گیری کیفیت گاز خروجی استفاده گردید. با توجه به‌این‌که تقریباً ٪۹۹ بیوگاز از سه گاز متان دی‌اکسیدکربن و آمونیاک تشکیل شده است با عبور نمونه‌ها از محلول بی‌کربنات سدیم (تزریق بیوگاز کف محلول) (٪۳ w/v) و جذب گاز دی‌اکسیدکربن بیوگاز توسط محلول، تقریباً فقط دو گاز متان و آمونیاک از محلول خارج می‌گردد که می‌تواند با دقت مناسبی به‌عنوان متان تولیدی در نظر گرفته شود. این روش یکی از متداول‌ترین و آسان‌ترین روش‌ها جهت اندازه‌گیری کیفیت بیوگاز تولیدی هاضم‌ها می‌باشد (Lesteur *et al.*, 2010).

قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیک[1] (ABD) با تقسیم پتانسیل تولید بیومتان (BMP) به‌دست آمده از نتایج آزمایش بر پتانسیل تولید متان بیوشیمیایی تئوری طبق رابطه (۲) به‌دست آمد (Heo *et al.*, 2004; Sahito *et al.*, 2013).

$$ABD\% = \frac{BMP_{observed}}{BMP_{theoretical}} \qquad (۲)$$

زمانی‌که ترکیبات ارگانیک (لیپیدها، پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها) مشخص باشند میزان تولید تئوری متان به‌صورت میلی‌لیتر بر وزن ماده جامد فرار می‌تواند از رابطه (۳) محاسبه گردد (Raposo *et al.*, 2011).

$$BMP = 415 \times \%carbohydrates + 496 \times \%proteins + 1014 \times \%lipids + \%\ lignin\ 727 \qquad (۳)$$

1- Anaerobic Biodegradability

ضرایب این رابطه از تبدیل استوکیومتری اجزای مدل بوسول با در نظر گرفتن فرمول میانگین و تخمینی ($C_6H_{10}O_5$) برای کربوهیدرات‌ها، ($C6H_{10}O_5$) برای پروتئین‌ها و ($C_{57}H_{104}O_6$) برای لیپیدها منشا می‌گیرند (Angelidaki and Sanders, 2004).

برای مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز به‌صورت تابعی از زمان مدل‌های سینتیک زیادی ارائه گردیده است که سه مدل ریاضی گومپرتز[2]، لجستیک[3] و ریچاردز[4] از متداول‌ترین آن‌ها می‌باشند. این مدل‌ها جهت پیش‌بینی روند رشد جمعیت باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی به‌کار می‌روند (Zwietering *et al.*, 1990).

معادله گومپرتز

$$M = p \times exp\left\{-exp\left[\frac{\mu_m \times e}{p}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \qquad (۴)$$

در این رابطه μ_m میزان تجمعی تولید بیوگاز (ml/g VS)، P پتانسیل تولید متان (ml/g VS)، M حداکثر نرخ تولید متان (ml/g VS day)، λ طول مرحله تاخیر و t زمان می‌باشد (Lay *et al.*, 1998).

معادله لجستیک

$$M = p/\left\{1 + exp\left[\frac{4\mu_m}{p}(\lambda - t) + 2\right]\right\} \qquad (۵)$$

معادله ریچاردز

2- Gompertz
3- Logistic
4- Richards

$$M = p\left\{1 + v \times exp(1+v)exp\left[\frac{\mu_m}{p}(1+v)^{1+\frac{1}{v}}(\lambda - t)\right]^{\frac{1}{v}}\right\} \quad (۶)$$

در این رابطه، v پارامتر شکل راکتور می‌باشد که با توجه به شکل راکتور متفاوت می‌باشد و در اینجا همچون سه فاکتور دیگر از نتایج داده‌های آزمایشگاهی استخراج می‌گردد.

در این مطالعه هر سه مدل، مورد بررسی قرار گرفت و توسط نرم‌افزار متلب با کمک الگوریتم لونبرگ- مارکورات[۱] پارامترهای میزان تجمعی تولید بیوگاز حداکثر نرخ تولید متان و طول مرحله تاخیر مربوط به‌مدل‌ها محاسبه گردید. برای این منظور مشاهده‌های آزمایش شامل میزان تجمعی تولید (μ_m) در هر روز (t) به‌نرم‌افزار وارد گردید تا پارامترهای ذکر شده محاسبه گردد (Waezi-Zadeh *et al.*, 2010). جهت کنترل و مقایسه کارایی مدل‌ها از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) استفاده گردید.

نتایج و بحث

روند تولید متان و بیوگاز

در شکل ۳ تولید گاز روزانه تحت شرایط دمایی مختلف مورد آزمایش نشان داده شده است همان‌گونه که از نمودار مشخص است تحت دمای کنترل شده محیط فرآیند هضم مدت زمان بیش‌تری به‌طول می‌انجامد و زمان ماند و زمان حداکثر تولید به‌طور چشم‌گیری نسبت به دو تیمار دیگر بیش‌تر می‌باشد. از بعد آماری نیز در سطح معنی‌داری یک درصد زمان ماند و زمان پیک تولید این تیمار نسبت به دو تیمار دیگر بیشتر می‌باشد (جدول ۲). زمان حداکثر تولید متان در تیمار محیط در روز ۳۷ ام با میزان ۶/۹۹ $ml\ g\text{-}VS^{-1}$ مشاهده می‌گردد در حالی‌که این زمان در تیمار ۳۷ درجه در روز ۲۲ ام به میزان تولید ۲۰/۱۶ $ml\ g\text{-}VS^{-1}$ و در تیمار ۴۷ درجه در روز ۲۰ ام به میزان ۲۵/۵۷ $ml\ g\text{-}VS^{-1}$ مشاهده می‌گردد. در هر سه نمودار تولید شاهد یک پیک اولیه تولید و کاهش میزان تولید پس از چند روز سپس افزایش دوباره تولید می‌باشیم. به نظر می‌رسد که در روزهای اولیه تولید به دلیل وجود محیط مناسب کشت مایه تلقیح، باکتری‌های بی‌هوازی (هیدرولیزکننده) موجود به سرعت شروع به رشد و تغذیه از تفاله‌های سیب موجود در سوبسترا و تولید بیوگاز می‌کنند و حجم دی‌اکسیدکربن تولیدی افزایش می‌یابد اما از طرف دیگر فعالیت باکتری‌های متان‌زا به این شدت نمی‌باشد و درصد متان بیوگاز ناچیز می‌باشد (Nazari and Nasiri, 2013). همان‌گونه که از نمودارهای درصد متان (شکل ۵) و نمودار تولید متان روزانه (شکل ۴) نیز مشخص است در روزهای اولیه تولید، درصد متان بیوگاز پایین‌تر می‌باشد و پیک اولیه تولید در نمودار تولید متان (شکل ۴) کوچک‌تر می‌باشد. در تیمار ۳۷ و ۴۷ درجه پس از ۳۵ روز تقریباً تولید بیوگاز به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد اما در تیمار محیط پس از ۵۵ روز همچنان فرآیند تولید ادامه پیدا کرده است.

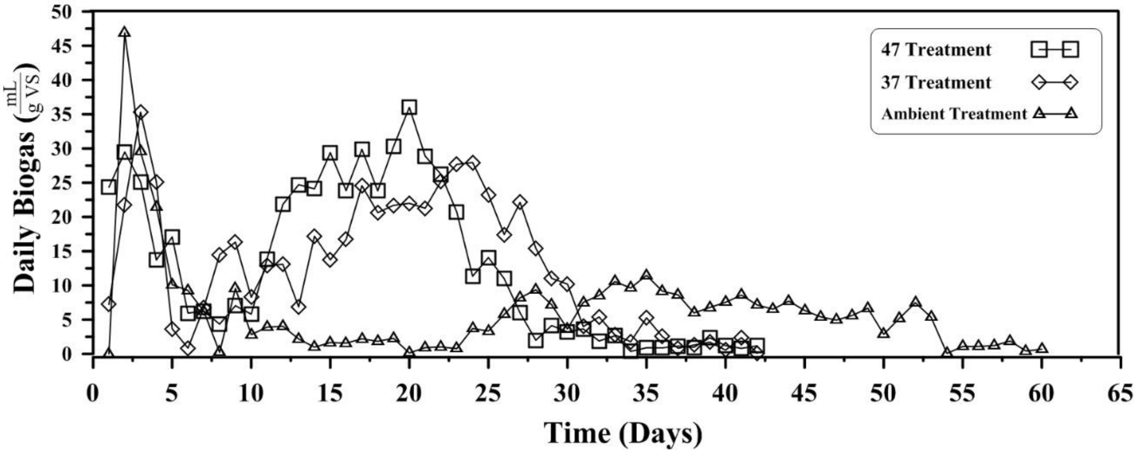
زمان ماند اقتصادی و زمان تأخیر در تولید بیوگاز از فاکتورهای مهم هضم زیست‌توده می‌باشند که معمولاً برای طراحی هاضم‌های پیوسته کارایی زیادی دارند (Salmani *et al.*, 2017). مطالعات مختلفی برای اندازه‌گیری این فاکتورها در محصولات زیست‌توده مختلف صورت پذیرفته است و دامنه گسترده‌ای از زمان هضم توسط محققین گزارش گردیده است. به‌طور معمول فرآیند پتانسیل‌سنجی تولید متان بیوشیمیایی بسیار زمان‌بر می‌باشد (Lesteur *et al.*, 2010). طی مطالعه‌ای محققان با بررسی زمان ماند در تولید بیوگاز از چندین نوع جلبک آبی عنوان می‌دارد که ۸۰ الی ۹۰ درصد پتانسیل بیوگاز سوبسترا پس از ۱۰ روز اول قابل حصول می‌باشد (Hanssen *et al.*, 1987). محققین زمان هضم ۳۰ روز را برای انجام فرآیند کامل هضم کود گاوی در دمای ۳۵ درجه مناسب می‌دانند (Owen *et al.*, 1979). هرچند زمان‌های هضم بسیار بالا همچون ۲۴۰ روز در مورد هضم بی هوازی ضایعات شهری در دمای محیط (Rao *et al.*, 2000) و ۳۶۵ روز در مورد هضم بی هوازی ضایعات شهری در ترکیب با مایع شکمبه گاوی در دمای محیط (Lopes *et al.*, 2004) و همچنین زمان‌های هضم بسیار کوتاه همچون ۷ روز در مورد هضم تفاله روغن‌گیری آفتابگردان در ترکیب با نسبت‌های زیاد مایه تلقیح در دمای ۳۵ درجه (Raposo *et al.*, 2008) نیز توسط محققین گزارش گردیده است.

جدول ۲ تحلیل آماری تولید متان و بیوگاز در تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. میزان متان بیوگاز و درصد متان تیمار سایکروفیلیک در سطح آماری ۱ درصد نسبت به دو تیمار دیگر کمتر بوده است. دو تیمار ۳۷ و ۴۵ درجه نیز در سطح آماری ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار در میزان متان تولیدی بوده‌اند اما میزان بیوگاز تولیدی دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد (جدول ۲).

شکل ۶ روند تغییرات pH سوبسترا را نشان می‌دهد که به فاصله زمانی سه روز اندازه‌گیری گردیده است. بر اثر واکنش‌های بیولوژیکی عمدتاً ناشی از فعالیت باکتری‌های اسیدزا pH در روزهای آغازین روند نزولی را طی می‌کند. در هر سه تیمار در روز دهم آزمایش کمترین میزان pH ثبت گردیده است و در روزهای ۳۴ الی ۴۰ بیشترین میزان pH ثبت شده است. دلیل افزایش pH می‌تواند انتقال واکنش‌های درون راکتور به سمت فرآیندهای متان‌زایی باشد (Doagoi *et al.*, 2011). در تیمارهای ۳۷ و ۴۷ درجه این زمان تقریباً مصادف با کاهش شدید تولید بیوگاز و تولید بیوگاز با بیشترین درصد متان می‌باشد در حالی‌که در تیمار دمای محیط با سپری شدن زمان، pH محیط دوباره روند نزولی به خود می‌گیرد و محلول به سمت اسیدی

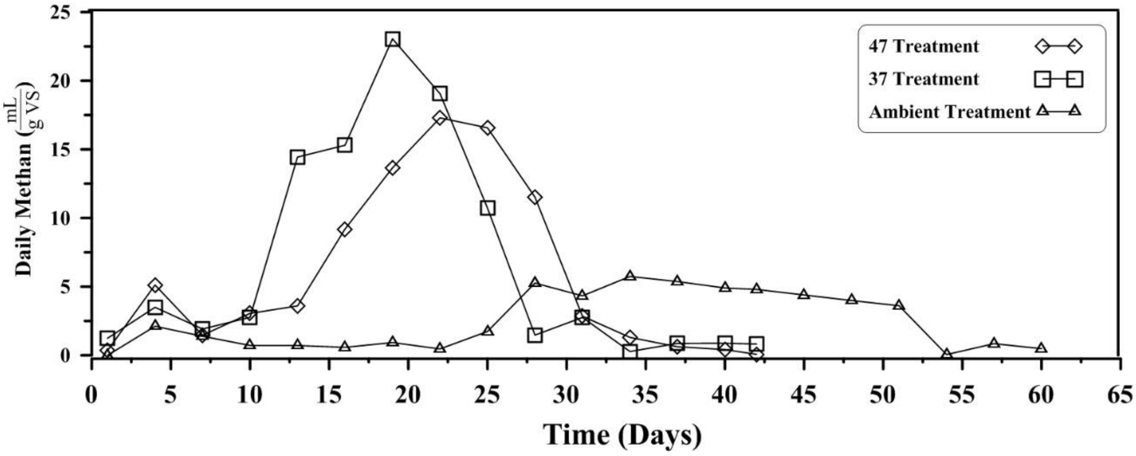
1- Levenberg-Marqurat

شدن پیش می‌رود که خود می‌تواند یکی از عوامل کاهش تولید بیوگاز راکتور باشد (Haji Agha Alizadeh *et al.*, 2014).



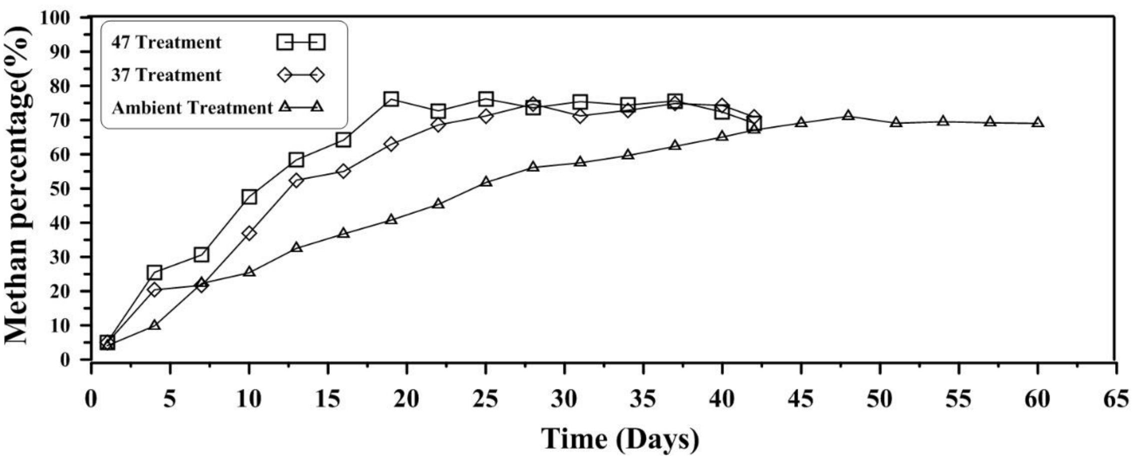
شکل ۳- نمودار تولید روزانه بیوگاز

Fig.3. Daily biogas production



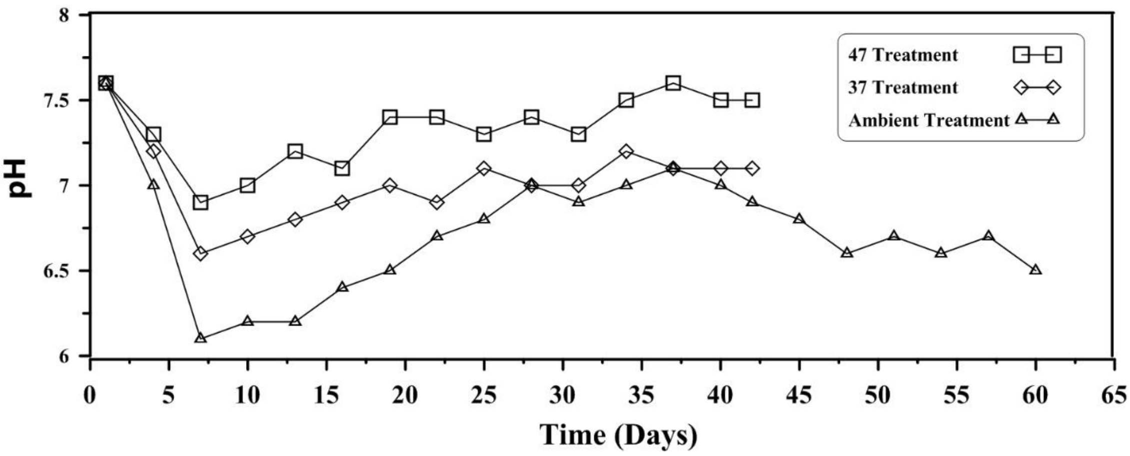
شکل ٤- نمودار تولید روزانه متان

Fig.4. Daily methane production



شکل ۵- تغییرات درصد متان بیوگاز

Fig.5. Change in daily methane content



شکل ٦- تغییرات روزانه pH هاضم‌ها
Fig.6. Change in the value of pH in reactors

جدول ۲- مقایسه آماری تولید متان و بیوگاز تیمارهای دمایی مورد بررسی
Tab1e 2- Statistical analysis of methane and biogas production in evaluated temperature treatments

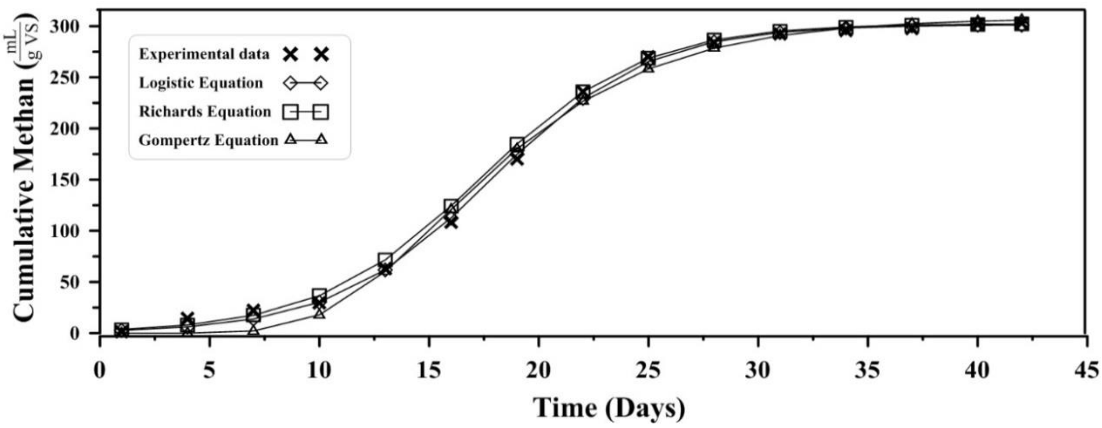
تیمار **Treatment**	بیشترین تولید روزانه متان **Maximum daily methane (ml g-VS^{-1})**	پیک زمان تولید **Time of maximum daily methane**	تولید تجمعی متان **Cumulative methane production (ml g-VS^{-1})**	میانگین درصد متان **Average methane content (%)**	تولید تجمعی بیوگاز **Cumulative biogas production (ml g-VS^{-1})**
دمای محیط Ambient treatment	6.99^{aA}	35^{aA}	153.74^{aA}	41%^{aA}	373.03^{aA}
۳۷ درجه سانتی‌گراد 37° C Treatment	20.16^{bB}	22^{bB}	289.03^{bB}	54%^{bB}	539.31^{bB}
۴۷ درجه سانتی‌گراد 47° C Treatment	25.57^{cC}	20^{bC}	302.70^{cC}	56%^{bC}	542.52^{bB}

اعداد با حروف متفاوت نشان‌دهنده معنی‌داری اختلاف در سطح مورد بررسی (حروف بزرگ معنی‌داری در سطح ۵ درصد و حروف کوچک معنی‌داری در سطح یک درصد) می‌باشند

Numbers with different letters show a significant difference in the evaluated level (large letters show difference at 5% probability and small letters show difference at 1% probability)

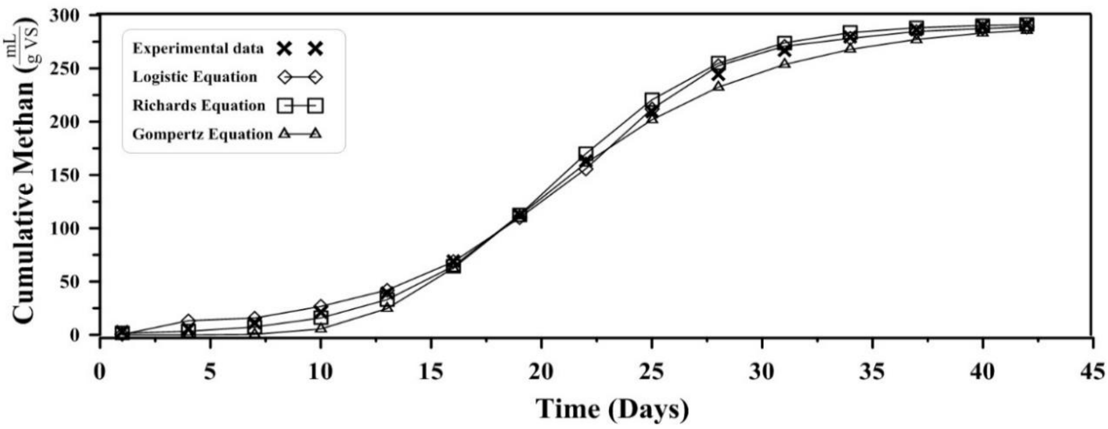
مدل‌سازی تولید روزانه متان

در این مطالعه توسط مدل‌های سینتیک موجود اقدام به تحلیل فرآیند تولید بیوگاز گردید. همان‌گونه که مشخص می‌باشد هر سه مدل توانسته‌اند با دقت بسیار بالایی روند داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی را دنبال کنند هرچند نتایج مدل لجستیک دقت بالاتری را ارائه داده است (شکل‌های ۷، ۸ و ۹). نتایج تحلیل آماری نیز حاکی از ضریب تبیین بالاتر و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات کمتر این مدل می‌باشد (جدول ۳). همچنین در تیمار ۴۷ درجه سیلیسیوس کارایی مدل‌های مورد بررسی بیشتر بوده است و این مدل‌ها در این تیمار با دقت بیشتری توانسته‌اند فرآیند تولید را پیش‌بینی کنند. همان‌گونه که قبلاً نیز ذکر گردید در روزهای اولیه، تولید متان از شدت بالاتری برخوردار است که هیچ‌یک از مدل‌های مورد بررسی قادر به‌نمایش مناسب این تغییرات نبوده است. مطالعات زیادی نیز استفاده از این معادلات برای مدل‌سازی فرآیند هضم نسبت به‌زمان را در محصولات زیست‌توده مختلف مناسب عنوان کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، مدل لجستیک را مناسب‌ترین مدل جهت تحلیل فرآیند تولید بیوگاز از تفاله‌های گل محمدی عنوان می‌دارند هرچند محققین کارایی مدل‌های گومپرتز و ریچاردز را نیز در حد بالا و قابل‌قبول عنوان می‌دارند (Doagoi *et al.*, 2011). طی مطالعه‌ای نیز کارایی مدل گومپرتز جهت تحلیل فرآیند هضم زباله‌های شهری را مناسب عنوان می‌دارند (Nopharatana *et al.*, 2003). در مطالعه مشابهی محققین کارایی مدل‌های گوسی شکل و گومپرتز را جهت مدل‌سازی تولید متان زباله‌های شهری مناسب عنوان می‌دارند (Lo *et al.*, 2010).



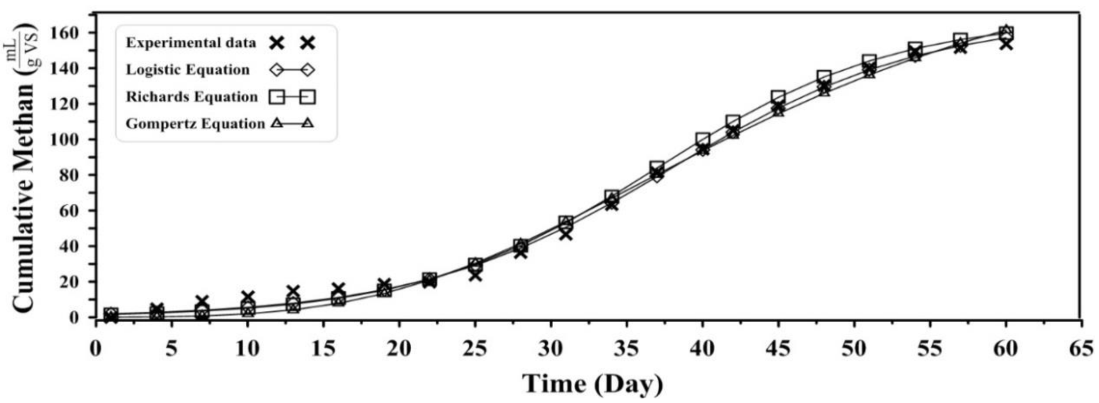
شکل ۷- نتایج مدل‌سازی سینتیک تولید تجمعی متان در دمای ۴۷ درجه

Fig.7. Results of kinetic modeling of cumulative methane production at 47 °C



شکل ۸- نتایج مدل‌سازی سینتیک تولید تجمعی متان در دمای ۳۷ درجه

Fig.8. Results of kinetic modeling of cumulative methane production at 37 °C



شکل ۹- نتایج مدل‌سازی سینتیک تولید تجمعی متان در دمای محیط

Fig.9. Results of kinetic modeling of cumulative methane production at ambient temperature

جدول ۳- تحلیل آماری نتایج مدل‌سازی سینتیک تولید متان تجمعی در دماهای مختلف
Table 3- Results of statistical analysis of methane production modeling at different temperatures

تیمار Treatment	RMSE			R^2		
	معادله گومپرتز Gompertz equation	معادله لجستیک Logistic equation	معادله ریچاردز Richards equation	معادله گومپرتز Gompertz equation	معادله لجستیک Logistic equation	معادله ریچاردز Richards equation
دمای محیط Ambient treatment	6.09	3.62	2.04	0.9896	0.9963	0.9940
۳۷ درجه سانتی‌گراد 37º C Treatment	11.00	4.87	23.63	0.9926	0.9985	0.9981
۴۷ درجه سانتی‌گراد 47º C Treatment	10.54	4.69	28.66	0.9939	0.9988	0.9980

قابلیت تجزیه‌پذیری تفاله‌های سیب

بر پایه داده‌های آزمایش میزان پتانسیل تولید متـان بیوشـیمیایی محاسباتی در دمـای مزوفیلیـک و ترموفیلیـک بـه‌ترتیـب ۲۸۹/۰۳ و ۳۰۲/۷۰ میلی‌لیتر بر گرم وزن ماده خشک فرار به‌دست می‌آید کـه بـا مقایسه آن با محصولات مشابه و مطالعات مشابه می‌توان ایـن میـزان را قابل قبول عنوان کرد. محققین پتانسیل تولید متان ضایعات سـیب را برابر ۳۱۷ ml g-VS^{-1} محاسبه کرده‌اند (Buffière *et al.*, 2006). در مطالعه دیگری پتانسیل تولید متان از ترکیبات مختلف کدو و سیب درختی را برابر ۲۶۳ الی ۴۷۸ میلی‌لیتر بر گرم وزن ماده خشک عنوان می‌دارند (Dubrovskis and Plume, 2017). مطالعه مشابه دیگری پتانسیل تولید متان از برگ درخت سیب در ترکیـب بـا کـود دامـی را برابر ۳۴۰ ml g-VS^{-1} عنـوان مـی‌دارد (Dar and Tandon, 1987 Hassan). با توجه به نتایج به‌دست آمده از تجزیه ترکیبات تفاله سیب پتانسیل تولید متان بیوشیمیایی تئوری به‌طـور میـانگین برابـر میـزان ۴۷۳/۷۰ ml g-VS^{-1} محاسـبه گردیـد. بـر ایـن اسـاس قابلیـت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی تفاله‌های سیب برابر ۶۳/۹٪ محاسبه می‌گردد که حاکی از پتانسیل بسیار بالا و قابلیت زیاد تولید بیوگاز از تفاله‌هـای سیب می‌باشد. طی مطالعه مشـابهی (Prabhudessai *et al.*, 2013) عنوان می‌دارند پتانسیل تئوری تولید متـان تفالـه‌هـای روغـن‌گیـری نارگیل برابر ۴۹۰ ml g-VS^{-1} می‌باشـد کـه در شـرایط آزمایشـگاهی میزان ۳۲۰ ml g-VS^{-1} آن استخراج گردید.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور بررسی پتانسیل بیوشمیایی تولید متان و همچنین تحلیل فرآیند تولید متان تفاله‌های سیب به‌منظور ارائه راهکاری جهت مدیریت تفاله‌های کارخانه‌های آب‌میوه‌گیری اقدام به ساخت و راه‌اندازی ۹ هاضم گسسته گردید. داده‌های آزمایش می‌توانند در جهت طراحی هاضم‌های صنعتی در کارخانه‌های آب میوه‌گیری کارایی زیادی داشته باشند. همچنین در این مطالعه روند تولید تحت تیمارهای مختلف دمایی محیط، ۳۷ و ۴۷ درجه تحلیل گردید. نتایج مطالعه حاکی از پتانسیل تئوری بالای تفاله‌های سیب جهت تولید متان می‌باشد که در شرایط آزمایش تا میزان ۶۴ درصد آن استحصال گردید. قابلیت تجزیه‌پذیری تفاله‌های سیب بالا می‌باشد و به‌جز pH سیب که اسیدی می‌باشد (و در شرایط آزمایش به شکل مطلوبی کنترل گردید) سایر فاکتورهای تفاله سیب برای فعالیت باکتری‌های متان‌زا مناسب می‌باشند. همچنین از نظر مواد مغذی نیز تفاله‌های سیب محیط مناسبی برای رشد باکتری‌های متان‌زا می‌باشند. نتایج مدل‌سازی سینتیک فرآیند تولید متان نیز حاکی از تطبیق بالای مدل‌های سینتیک مورد بررسی با شرایط آزمایشگاهی می‌باشد.

References

1. AOAC. 1990. Official methods of analysis of the AOAC, 15th ed. Methods 932.06, 925.09, 985.29, 923.03. Association of official analytical chemists. Arlington, VA, USA.
2. Ağdağ, O. N., and D. T. Sponza. 2007. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. Journal of hazardous materials 140: 75-85.
3. Agrahari, P. R., and D. Khurdiya. 2003. Studies on preparation and storage of RTS beverage from pulp of culled apple pomace. Indian Food Packer 57: 56-61.
4. Alzate-Gaviria, L. M., P. Sebastian, A. Pérez-Hernández, and D. Eapen. 2007. Comparison of two anaerobic systems for hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste and synthetic wastewater. International Journal of Hydrogen Energy 32: 3141-3146.

5. Angelidaki, I., and W. Sanders. 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology 3: 117-129.
6. Buffière, P., D. Loisel, N. Bernet, J. P. Delgenes. 2006. Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. Water Science and Technology 53: 233-41.
7. Chen, Z., D. Hu, Z. Zhang, N. Ren, and H. Zhu. 2009. Modeling of two-phase anaerobic process treating traditional Chinese medicine wastewater with the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1. Bioresource Technology 100: 4623-4631.
8. Ding, H.-B. and J.-Y. Wang. 2008. Responses of the methanogenic reactor to different effluent fractions of fermentative hydrogen production in a phase-separated anaerobic digestion system. International Journal of Hydrogen Energy 33: 6993-7005.
9. Doagoi, A., A. Ghazanfari Moghaddam, and M. H. Fooladi. 2011. Investigating and Modeling the Process of Biogas Production while Utilizing the Wastes of Damask Rose Distillation. Iranian Journal of Biosystems Engineering 42: 95-102. (In Farsi).
10. Dubrovskis, V., and I. Plume. 2017. Biogas from wastes of pumpkin, marrow and apple. Agronomy Research 15 (1): 69-78.
11. El-Mashad, H. M., and R. Zhang. 2010. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource Technology 101 (11): 4021-4028.
12. Fang, W., P. Zhang, G. Zhang, S. Jin, D. Li, M. Zhang, and X. Xu. 2014. Effect of alkaline addition on anaerobic sludge digestion with combined pretreatment of alkaline and high pressure homogenization Bioresource Technology 168: 167-172.
13. FAOSTAT. 2019. Apple production in 2017. Crops World Regions Production Quantity": UN Food & Agriculture Organization, Statistics Division.
14. Haji Agha Alizadeh, H., F. Rahimi Sardari, and S. A. Radmdar. 2014. Effect Of Reactor Temperature on the Rate of Biogas Production from Quail Manure. in First National Conference of Agriculture, Environment and Food Security. Jiroft. (In Farsi).
15. Hanssen, J. F., M. Indergaard, K. Østgaard, O. A. Bævre, T. A. Pedersen, and A .Jensen. 1987. Anaerobic digestion of Laminaria spp. and Ascophyllum nodosum and application of end products. Biomass 14: 1-13.
16. Hassan Dar, Gh., and S. M. Tandon. 1987. Biogas production from pretreated wheat straw, lantana residue, apple and peach leaf litter with cattle dung, Biological Wastes 21 (2): 75-83.
17. Heo, N. H., and S. C. Park, and H. Kang. 2004. Effects of mixture ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge. Journal of Environmental Science and Health, Part A 39: 1739-1756.
18. Hoseinzadeh, Y. 2013. Investigating the potential of biogas production from lettuce and cabbage waste in common digestion with cow manure. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad.
19. Labatut, R. A., L. T. Angenent, and N. R. Scott. 2011. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. Bioresource Technology 102: 2255-2264.
20. Laurinovica, L., J. Jasko, E. Skripsts, and V .Dubrovskis. 2013. Biochemical methane potential of biologically and chemically pretreated sawdust and straw. Pages 468-471. Proceedings of the 12th International Scientific Conference: Engineering for Rural Development.
21. Lay, J.-J., Y.-Y. Li, and T. Noike. 1998. Developments of bacterial population and methanogenic activity in a laboratory-scale landfill bioreactor. Water Research 32: 3673-3679.
22. Lesteur, M., V. Bellon-Maurel, C. Gonzalez, E. Latrille, J. Roger, G. Junqua, and J. Steyer. 2010. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: a review. Process Biochemistry 45: 431-440.
23. Lianhua, L., L. Dong, S. Yongming, M. Longlong, Y. Zhenhong, and K. Xiaoying. 2010. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China. International Journal of Hydrogen Energy 35: 7261-7266.
24. Lo, H., T. Kurniawan, M. Sillanpää, T. Pai, C. Chiang, K. Chao, M. Liu, S. Chuang, C. Banks, and S. Wang. 2010. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. Bioresource Technology 101: 6329-6335.
25. Lopes, W. S., V. D. Leite, and S. Prasad. 2004. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. Bioresource Technology 94: 261-266.
26. Nazari, A., and Nasiri, J. 2013. Types of anaerobic digesters for energy extraction from corrosive organic matter. Jornal of Renewable and New Energy 1 (2): 37-44.
27. Nopharatana, A., P. C. Pullammanappallil, and W. P. Clarke. 2003. A dynamic mathematical model for sequential leach bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. Biochemical Engineering Journal 13: 21-33.
28. Owen, W., D. Stuckey, J. Healy Jr, L. Young, and P. McCarty. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Research 13: 485-492.

29. Prabhudessai, V., A. Ganguly, S. Mutnuri. 2013. Biochemical Methane Potential of Agro Wastes. Journal of Energy (17): 1-7.
30. Rao, M., S. Singh, A. Singh, and M. Sodha. 2000. Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage. Applied Energy 66: 75-87.
31. Raposo, F., R. Borja, B. Rincon, and A. Jimenez. 2008. Assessment of process control parameters in the biochemical methane potential of sunflower oil cake. Biomass and Bioenergy 32: 1235-1244.
32. Raposo, F., V. Fernández-Cegrí, M. De la Rubia, R. Borja, F. Béline, C. Cavinato, G. Demirer, B. Fernández, M. Fernández-Polanco, and J. Frigon. 2011. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 86: 1088-1098.
33. Rincón, B., C. J. Banks, and S. Heaven. 2010. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Influence of growth stage and storage practice. Bioresource Technology 101 (21): 8179-8184.
34. Safley Jr, L., and P. Westerman. 1992. Performance of a low temperature lagoon digester. Bioresource Technology 41: 167-175.
35. Sahito, A. R., R. B. Mahar, and K. M. Brohi. 2013. Anaerobic biodegradability and methane potential of crop residue co-digested with buffalo dung. Mehran University Research Journal of Engineering & Technology 32: 509-518.
36. Salmani, F., A. Ehsan, and M. Salimi. 2017. The Feasibility of Building Two units Combined Heat and Power (CHP) With Biogas in Urban Wastewater Treatment Plant. Journal of Mechanical Engineering 47: 325-331 .(In Farsi).
37. Shariatifar, M. 2014. Investigating the potential of biogas production from citrus and livestock waste. Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Farsi).
38. Strömberg, S., M. Nistor, and J. Liu. 2014. Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. Waste Management 34: 1939-1948.
39. Symons, G., and A. Buswell. 1933. The methane fermentation of carbohydrates1, 2. Journal of the American Chemical Society 55: 2028-2036.
40. Waezi-Zadeh, M., A. Ghazanfari, and S. Noorbakhsh. 2010. Finite element analysis and modeling of water absorption by date pits during a soaking process. Journal of Zhejiang University SCIENCE B 11: 482-488.
41. Walker, M., Y. Zhang, S. Heaven, and C. Banks. 2009. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. Bioresource Technology 100: 6339-6346.
42. Xie, S., P. G. Lawlor, J. P. Frost, Z. Hu, and X. Zhan. 2011. Effect of pig manure to grass silage ratio on methane production in batch anaerobic co-digestion of concentrated pig manure and grass silage. Bioresource Technology 102: 5728-5733.
43. Zwietering, M., I. Jongenburger, F. Rombouts, and K. Van't Riet. 1990. Modeling of the bacterial growth curve. Applied and Environmental Microbiology 56: 1875-1881.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 305-316

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۳۱۶-۳۰۵

Potential Evaluation and Modeling of Biogas Production from Apple Pomace

M. Sami[1], A. Akram[2*], M. Sharifi[2]

Received: 27-04-2019
Accepted: 11-09-2019

Introduction

The need to develop alternative energy sources especially renewable energy has become increasingly apparent with the incident of fuel shortages and escalating energy prices in recent years. With the advent of renewable energy, various studies have been conducted to investigate the potential of biogas production from agricultural waste. Considering the importance of retention time and methane production potential for designing industrial digesters, many studies on potential analysis and modeling of the digestion process of different products have been carried out by various researchers. These studies are valuable for the design and implementation of anaerobic digesters. Apple is one of the most popular fruits in many parts of the world and is widely cultivated in many temperate regions of the world. Considering the large volume of apple waste in Iran, this study was designed based on potential evaluation and modeling of biogas production from apple pulp.

Materials and Methods

In order to measure the potential of biogas production from apple pomace, a number of lab-scale digesters with a capacity of 600 ml and a working capacity of 400-500 ml were made. pH and C/N ratio were modified by adding NaOH and urea solution, respectively. Three different temperature treatments including psychrophilic (ambient temperature), mesophilic (37ºC), and thermophilic (47ºC) were applied to the substrate. Used pomace samples were collected from the output of an apple juice factory in southern Isfahan province, Iran. Anaerobic Biodegradability (ABD) was obtained by dividing the experimental methane production potential (BMP) obtained from the experimental results on the theoretical methane production potential. Three most common kinetic models of Gompertz, Logistic, and Richards were used to predict and stimulate the cumulative methane production of treatments.

Results and Discussion

Under ambient temperature, the digestive process took a longer time, and the time of maximum dilly biogas production was considerably more than the other two treatments. Statistically, production time and peak time of this treatment was higher than the other two treatments at 1% significance level. Maximum daily biogas production in the ambient treatment was observed on day 37th with a volume of 6.99 g-VS^{-1} ml, while maximum daily biogas production in the treatments of 37 °C and 47 °C were observed on days 22th (20.16 ml g-VS^{-1}) and 20th (25.57 ml g-VS^{-1}), respectively. In all three treatments, daily biogas production increased sharply in the first incubation days and after that reduced and then production increased again. In mesophilic and thermophilic treatments, the production of biogas modestly stopped after 35 days, but under the ambient temperature, the process of production continued after 55 days. The methane concentration of biogas in the psychrophilic treatment was significantly lower than the other two treatments at 1% level. Two treatments of 37°C and 45°C have a significant difference in methane yield at 1% level. Nevertheless, the production of biogas in two treatments was not statistically different. In all three treatments, the lowest pH was recorded after 7 days of production and the highest pH was recorded on days 34-40. All three kinetic equations were able to simulate the methane production process with high precision, although the results of the Logistic model provided higher accuracy. In the treatment 47 °C, the efficiency of the studied equations was higher than other treatments and models were able to predict the production process with higher accuracy. Results of the experiment show the high biochemical methane production potential of apple pomace (473.17 ml g-VS^{-1}), which under laboratory condition of this study up to 63.9% of this potential (302.70 ml g-VS^{-1}) was obtained.

Conclusions

This study results are valuable for the design and implementation of industrial digesters. The results indicate the apple pomace has a high potential for the production of methane and its biodegradability is high. Apart from pH that is acidic, other apple pulp factors are appropriate for the activity of methanogenic bacteria. In terms of nutrients, apple pomace is also a good environment for the growth of anaerobic bacteria.

Keywords: Biogas, Methane, Modeling, Potential

1- PhD Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: aakram@ut.ac.ir)